

L'INTÉRÊT DE L'ÉTUDE DES BRISES THERMIQUES : EXEMPLES DES BRISES LITTORALES ET OROGRAPHIQUES

Gérard BELTRANDO, Salem DAHECH et Malika MADELIN

Résumé

Cet article présente le mécanisme de la brise thermique puis les principales évolutions techniques récentes dans le domaine de la mesure et de la modélisation numérique, permettant d'affiner la description de ce phénomène. Plusieurs applications, à différentes échelles spatiales fines, sont présentées ensuite pour illustrer l'utilité de l'étude des brises littorales et orographiques. Ce type d'étude géographique permet de répondre à une demande sociale croissante dans des secteurs qui se sont diversifiés (agriculture, biométéorologie, urbanisme...).

Mots-clés

Brises littorales, brises orographiques, climatologie appliquée, pollution de l'air

Abstract

This paper presents the mechanism of thermal breeze and the principals' technical progress in the field of instrumental measures and in the numerical model used to describe this phenomenon. Some applications, at fine spatial scales, to show the interest of costal and topographic breezes study. This type of geographical study helps to take decisions for a strong social demand in diversified sectors (agriculture, biometeorology, urban planning...).

Keywords

Sea-land breezes, topographic breezes, applied climatology, air pollution

INTRODUCTION

La brise est un *vent alternant journalier* de la couche limite (couche d'atmosphère subissant directement les effets de la surface de la planète tels que sa température, son humidité, sa rugosité...) qui découle du contraste thermique entre deux surfaces contiguës et qui se manifeste par un changement de direction et de vitesse du vent. Le phénomène décrit est analysé dans la littérature depuis longtemps (Frizzola & Ficher, 1963 ; Findlater, 1964 ; Geiger, 1966...) et, depuis une vingtaine d'années, son observation et sa description ont fait l'objet d'un nombre important de publications, que ce soit pour les brises *littorales* (Pédelaborde, 1985 ; Oke, 1987 ; Carrega, 1989, 1994 ; Simpson, 1994 ; Planchon, 1997 ; Damato *et al.*, 2003 ; Dahech, 2007...) ou *orographiques* (Fallot, 1992 ; Kastendeuch, 1996 ; Bridier, 2001 ; Quénol, 2002 ; Madelin, 2004...) ou *urbaines* (Dettwiller, 1970 ; Oke, 1993 ; Carrega, 1994 ; Lowry, 1997 ; Charabi, 2001 ; Cantat, 2004...). Les brises intéressent les géographes climatologues parce que, d'une part, ce phénomène nécessite souvent la prise en compte

d'une hiérarchisation des écoulements à plusieurs niveaux d'échelles et les géographes sont habitués à cette approche multi-scalaire ; d'autre part, parce que les brises peuvent avoir des répercussions sur divers domaines concernant les rapports entre le milieu physique et la société (diffusion ou concentration de la pollution d'origine industrielle ou urbaine, ventilation et rafraîchissement de l'air dans une rue, déplacement ou blocage de l'air froid au-dessus d'un espace agricole vulnérable au gel...) ; enfin, parce que les progrès de la technologie instrumentale (mini-capteurs de mesure et d'enregistrement des données, images satellitaires à haute résolution...) et ceux, plus récents, de la modélisation numérique, en permettent une meilleure compréhension. Si l'homme a su, empiriquement, tirer de nombreux bénéfices des brises, parfois depuis des millénaires (emplacement et orientation des ouvertures dans les constructions, heures de départ des bateaux pour la pêche, emplacement des moulins à vent...), c'est grâce à l'évolution technologique et informatique des dernières décennies qu'il est possible de mieux comprendre et prévoir l'apparition de ce phénomène afin d'utiliser au mieux cette ressource renouvelable et

de réduire ou d'anticiper ces effets néfastes sur certaines activités économiques ainsi que sur le confort et la santé des individus.

I. LES BRISES THERMIQUES : DES PHÉNOMÈNES LOCAUX IMBRIQUÉS   DES PHÉNOMÈNES D'ÉCHELLE SUPÉRIEURE

La circulation des brises thermiques est due à la différence d'échauffement ou de refroidissement, à l'échelle intra-quotidienne, entre deux surfaces voisines de nature différente (forêt/champ labouré, littoral/plan d'eau, surface urbanisée/surface végétalisée, etc.). Comme la température des surfaces influence celle de l'air sus-jacent, la différence de température des deux volumes d'air voisins génère un gradient thermique et donc une circulation atmosphérique locale dans les basses couches de l'atmosphère. Ce phénomène, mesurable lorsque le vent d'échelle spatiale supérieure est relativement faible, se manifeste par un changement de la direction et de la vitesse du vent entre le jour et la nuit, ce qui a des répercussions sur les températures de l'air et parfois aussi sur la nébulosité et la pluviométrie. Mais, lorsque le vent d'échelle spatiale supérieure est relativement soutenu, il brasse suffisamment l'air et les brises ainsi que les mouvements associés (ascendants ou subsidents) ne sont plus perceptibles, sauf lorsque la topographie permet des situations d'abri et l'interférence de divers mouvements (II. D.).

La présence de brises thermiques est plus marquée lorsque l'une des deux surfaces connaît, compte tenu de ces propriétés physiques, un réchauffement diurne ou un refroidissement nocturne relativement important par rapport à l'autre : c'est typiquement le cas des brises littorales (la brise de terre et la brise de mer, II. A.). Lorsque la topographie favorise sensiblement la canalisation de l'air, les brises sont également bien marquées : ce sont les brises orographiques (la brise de versant et la brise de vallée) qui peuvent se développer sur des dizaines de km de long et atteindre des vitesses relativement importantes (II. B.). Dans les milieux plus complexes, en particulier urbains, il est souvent moins évident de mettre en évidence des brises qui répondent à un schéma théorique, car la diversité des surfaces explique la diversité des bilans thermiques. De plus, la rugosité ainsi que la topographie du site contraignent les écoulements d'air (II. C.). Cette évocation des principaux types de brises, ne doit pas faire oublier que ces phénomènes interf rent entre eux et à diverses échelles spatiales et temporelles (II. D.).

A. L'exemple classique des brises littorales

Compte tenu de leur forte chaleur massique, les masses d'eau absorbent le jour, sur quelques mètres d'épaisseur, une grande partie du rayonnement solaire qui arrive à leur surface sans pour autant que leur température varie beaucoup par rapport à celle des masses continentales.

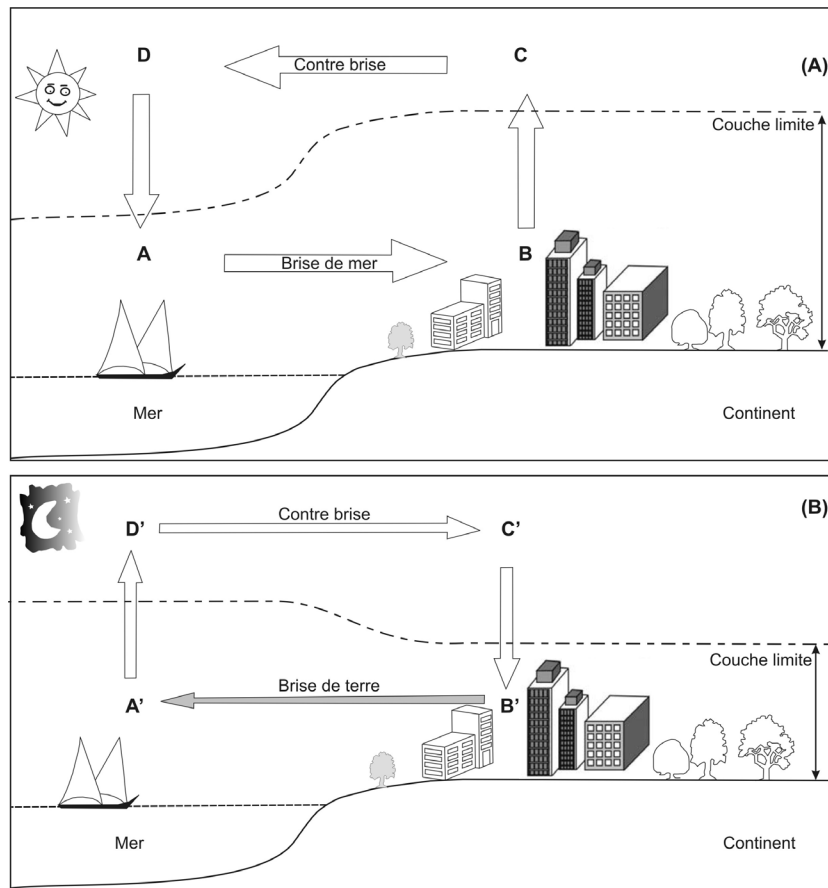


Figure 1. Schéma simplifié de la brise de mer (A) et de la brise de terre (B)

Inversement, la nuit, la surface de l'eau se refroidit moins vite que celle du continent. Il en résulte que l'amplitude de l'air à la surface de l'océan varie moins entre le jour et la nuit par rapport à celle observée au-dessus du continent voisin, surtout lorsque le vent est faible ou nul (faible brassage de l'air) et le ciel est clair ou peu nuageux (fort rayonnement de la surface vers l'atmosphère, faible rayonnement de l'atmosphère vers la surface).

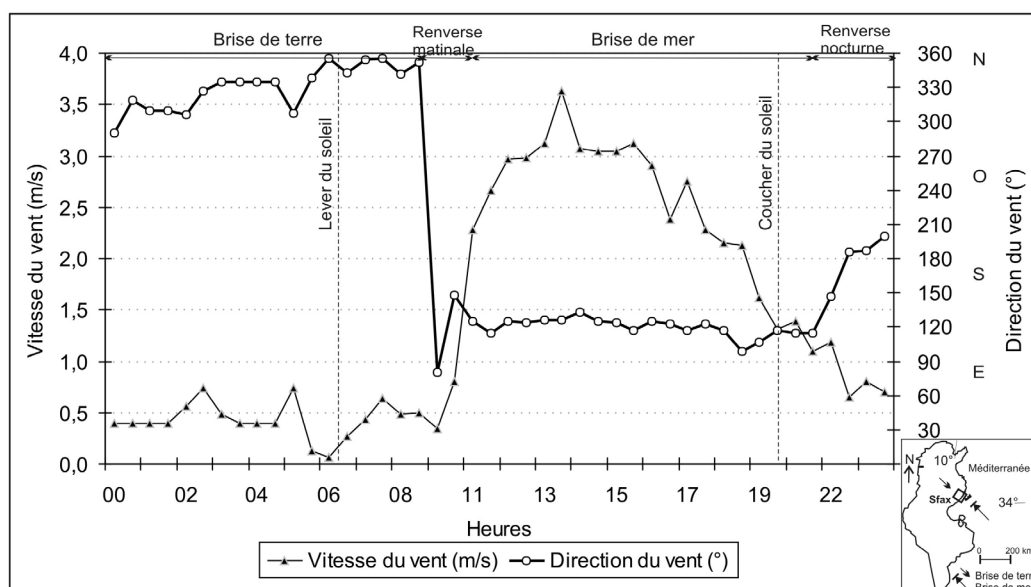
- Le jour, l'air au-dessus du substrat continental s'échauffe relativement vite, il s'élève (Figure 1A, branche BC) et la pression diminue en surface par rapport à celle observée sur la mer voisine à la même altitude. Le gradient de pression horizontal qui en découle permet un mouvement d'air plus frais et donc plus dense, dirigé de la mer vers la terre : c'est la *brise de mer* (Figure 1A, branche AB). Avec l'ascendance de l'air réchauffé, la pression se renforce relativement en altitude ce qui crée un gradient de pression d'altitude, lui-même à l'origine d'une *contre brise* ou *courant de retour* compensant l'afflux d'air maritime en surface (Figure 1A, branche CD). Ce courant de retour en altitude, qui n'est pas toujours facile à observer car il est souvent perturbé par la circulation atmosphérique d'échelle spatiale supérieure, peut apparaître à des altitudes qui varient de quelques dizaines à quelques centaines de mètres dans la zone tempérée (il est plus haut dans l'atmosphère sous les latitudes intertropicales où les quantités d'énergie absorbées par les substrats sont généralement plus importantes).

- La nuit, le phénomène fonctionne dans le sens inverse. Le refroidissement de la terre étant plus rapide

que celui de l'eau, il en résulte un vent dirigé de la terre vers la mer : c'est la *brise de terre* (Figure 1B, branche B'A'). Mais l'écart thermique entre les deux surfaces voisines étant plus faible, la brise de terre a une extension spatiale (horizontale et verticale) et une intensité généralement plus faibles car la couche limite au-dessus du substrat continental est stable (air relativement froid) et le mélange vertical est beaucoup plus réduit.

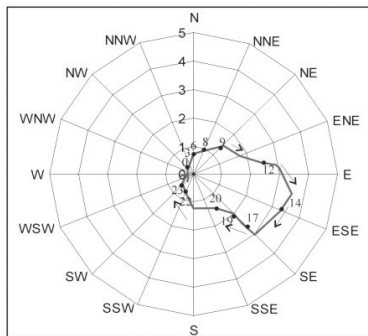
Cette différence entre les deux brises est observée lorsque les conditions météorologiques sont stables sur un cycle d'au moins 24 h. L'exemple illustré sur la figure 2, pour l'agglomération de Sfax (implantée sur le littoral tunisien, avec la mer à l'est de l'agglomération), montre bien cette différence de vitesse et de direction entre la brise de jour et celle, moins forte, de la nuit (Figures 2 et 3).

Les régions fréquemment sous l'influence de conditions météorologiques stables (ceinture de hautes pressions) enregistrent donc plus fréquemment que les autres ces vents alternants quotidiens séparés par des transitions appelées *renverses*. En situation atmosphérique stable sur au moins 24 h (vent d'échelle supérieure nul ou très faible), il y a donc deux renverses par jour : celle du matin (qui suit la brise de terre et devance la brise de mer) et celle de la nuit (qui prolonge la brise de mer et précède la brise de terre). La renverse nocturne s'observe quand la brise de mer cesse de souffler, en général quelques dizaines de minutes après le coucher du soleil (Figure 3).



Données mesurées par une station Davis avec anémomètre à 10 m de haut et à 1 km du littoral. Mesure d'une valeur toutes les 5 mn, puis enregistrement d'une moyenne sur 30 mn. La figure donne la moyenne de ces valeurs bi-horaires, calculée sur 162 jours de brises de juillet, août et septembre 2004, 2005 et 2006. Un vent de secteur E à S indique un vent venant de la mer, un vent de O à N un vent venant de l'intérieur des terres (mesures et calculs réalisés dans le cadre de la thèse de S. Dahech, 2007).

Figure 2. Vitesse et direction moyenne du vent durant les journées estivales de brise à Sfax sur le littoral tunisien (période 2004-2006)



Cette figure donne la direction horaire moyenne (chiffre 0 à 23) de la brise et sa vitesse (axe vertical de 1   5 m/s).

Figure 3. Hodographe moyen en situation de calme atmosphérique à Sfax-el-Maou (valeurs moyennes obtenues à partir des données horaires sur la période 1970-2002) (Dahech, 2007)

B. Les brises orographiques : l'influence de la canalisation par le relief

En présence de reliefs, même relativement modestes, et toujours lorsque les conditions météorologiques le permettent (temps calme), les différences de température aboutissent aussi à la formation de vents alternants quotidiens qui sont canalisés par la topographie. Durant la journée, les fonds de vallée et les versants plus directement exposés au soleil (adrets) absorbent plus de rayonnement solaire par unité de surface et donc se réchauffent plus que ceux qui sont moins exposés à ce rayonnement (ubacs). Comme l'air au-dessus de la surface se réchauffe par contact et s'élève le long des pentes, il donne naissance à un vent *ascendant* (ou *anabatique*) : la *brise de vallée* (Figure 5). La nuit, et quelle que soit la situation météorologique, les pertes par rayonnement tellurique entraînent le refroidissement de la surface et de l'air sus-jacent. En situation météorologique stable, cet air froid superficiel, plus dense, s'écoule par gravité vers les parties les plus basses (cuvette, fond de vallée) et il donne naissance à un vent *catabatique* : ce sont les *brises orographiques* (ou *brises de montagne*). Lorsque la topographie est bien marquée et le bassin versant de taille importante, cette brise descendante peut être assez forte (jusqu'à un ordre de grandeur de l'ordre de 10 m/s), surtout lorsque la nuit est déjà bien avancée, elle peut alors se développer sur plusieurs dizaines de km vers l'aval de la vallée.

La nature du substrat (roche à nu, glacier, forêt...) modifie aussi l'écoulement. Par exemple, la présence d'un glacier de taille importante, en refroidissant plus fortement l'air sus-jacent que les espaces voisins, entraîne une accélération de l'écoulement de l'air froid le long de la pente et cet air froid superficiel peut s'écouler vers la vallée, en dessous d'une brise de vallée...

C. Les brises urbaines : des contraintes multiples

Les brises sont plus difficiles à mettre en évidence et surtout à expliquer lorsque le milieu est caractérisé par une grande variabilité spatiale dans la nature, la rugosité ou encore la forme des surfaces. C'est typiquement le cas des agglomérations urbaines, même lorsqu'elles sont implantées sur un site plat et qu'elles ne subissent pas l'influence de la mer ou d'un vaste plan d'eau à proximité. La mosaïque des matériaux qui constituent les espaces urbains, avec des surfaces imperm eables à l'eau (bitume, toiture...) et d'autres plus perm eables (jardins, parcs...), explique la **grande variabilité des flux énergétiques** (modification de la part respective du flux de chaleur latente et du flux de chaleur sensible) et radiatifs (réflexion et absorption souvent plus importantes). Le phénomène de l'îlot de chaleur est clairement observé (température de l'air plus élevée dans le centre ville où l'habitat est généralement plus dense que dans les périphéries lorsqu'elles sont plus végétalisées) et il génère des brises allant de la périphérie vers ce centre plus chaud. Mais dans ces milieux complexes, les bilans radiatifs et énergétiques sont fortement variables dans le temps et dans l'espace pour plusieurs raisons. Par exemple, la pollution diminue le rayonnement solaire direct et augmente le rayonnement solaire diffus ainsi que le rayonnement infrarouge atmosphérique ; saisonnièrement le chauffage ou la climatisation anthropique interviennent à différentes échelles dans les bilans thermiques. Les brises thermiques qui se forment en ville sont aussi contraintes par les constructions et influencées par des facteurs d'échelle microclimatiques, tels les effets d'ombre, la présence de verdure, la couleur des façades, etc. Il est malgré tout possible de détecter, dans certaines agglomérations, des brises convergeant de la périphérie vers le centre. Ainsi, pour l'agglomération parisienne, Escourrou (1990) ou Cantat (2004) ont évoqué la présence d'une brise de campagne qui converge vers le centre ville, espace où se forme un îlot de chaleur urbain caractérisé par des mouvements turbulents permettant l'arrivée de la brise de campagne. Cette brise de campagne est aussi un vent à caractère local, généré par la discontinuité thermique entre le centre densément bâti d'une agglomération et sa périphérie environnante dominée par les surfaces moins imperm eabilis es, plus végétales et donc plus froides (les villes oasis, sous climat chaud, ne sont pas concernées).

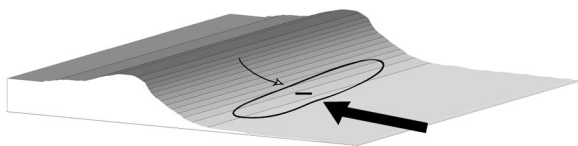
  une échelle spatiale intra urbaine (rue, îlot d'habitation...), des mouvements de l'air sont également observés, par exemple entre un espace v g tal s  et un espace imperm eabil s    proximité (l'absence d'eau à évaporer modifie la part respective des transferts de chaleur latente et de chaleur sensible) ou encore à l'intérieur d'un canyon urbain entre une façade à l'ombre et une exposée au soleil. Cet aspect de la recherche, qui entre dans le domaine de la microclimatologie urbaine, n'est pas abordé ici : voir par exemple les travaux de Kastendeuch *et al.* (2006) sur la modélisation du bilan radiatif et d'énergie dans un canyon urbain.

D. Les interactions entre la brise et les autres mouvements de l'air

Cette brève présentation des brises thermiques ne doit pas faire oublier le rôle d'autres phénomènes atmosphériques à des échelles parfois très différentes qui peuvent se combiner à la brise pour l'intensifier ou l'affaiblir, voire pour modifier fortement la direction des vents selon les cas. Les régions de montagne illustrent bien ce phénomène : en situation de brise (sans influence perceptible de vent d'échelle supérieure), nous avons vu que l'exposition et l'ensoleillement conditionnent les températures et que la taille et la morphologie des vallées contraignent la direction des brises. Mais ce schéma, théorique et très simplifié, est bien souvent perturbé par des vents d'échelles différentes qui se combinent aux brises et modifient leur intensité et leur trajectoire : soit en les ralentissant lorsque ce flux a une direction opposée à la brise (une des conséquences peut être la concentration de la pollution), soit au contraire en améliorant la ventilation lorsque les deux flux s'associent (dispersion des polluants...). La figure 4 schématise cela pour une brise de versant : l'air froid déplacé par la brise est soit bloqué dans le bas du coteau, soit évacué dans la vallée principale. Pour les brises littorales, un vent synoptique de faible ampleur peut avoir les mêmes types d'effet : par exemple, lors de la renverse, une brise peut prendre des directions différentes en fonction de la direction de cet autre vent d'échelle spatiale supérieure.

Les contraintes géographiques interviennent aussi fortement dans le fonctionnement des brises. Carrega (1989), à partir de l'analyse des données de deux stations proches du littoral azuréen, a bien montré la nécessité de l'observation de terrain pour hiérarchiser les divers phénomènes et tenir compte de la position des postes de mesure. Les brises peuvent être fondamentalement différentes pour deux stations voisines alors que pour d'autres, nettement plus éloignées, elles peuvent être similaires.

La figure 5 montre les interférences entre trois flux à échelles différentes en fonction de la topographie : un vent d'échelle synoptique (pas très fort mais pouvant souffler plusieurs jours de suite), une brise de mer (jour) et de terre (nuit) qui se développe le long du littoral et enfin des brises orographiques : brise de vallée (ascendante) le jour, brise de montagne (subsidente) la nuit. Les flux les plus forts peuvent affaiblir, accélérer ou même cisailler ceux qui sont moins actifs, ce qui est le cas des brises orographiques sur la figure.



L'analyse des brises pose donc en préalable, la question du choix des échelles spatiales d'analyse et, le cas échéant, celui du choix de l'emplacement des points de mesures, domaine dans lequel les géographes climatologues ont toute leur place, mais qui n'en reste pas moins complexe à aborder et qui nécessite une observation du terrain d'étude à plusieurs échelles spatiales.

Jusqu'au début des années 1980, l'observation des brises était souvent limitée à l'analyse des variables météorologiques mesurées sur quelques points, avec éventuellement des mesures de ces mêmes variables dans la couche limite à l'aide de mini ballons captifs. Les avancées technologiques des deux dernières décennies permettent d'affiner et de compléter ces observations.

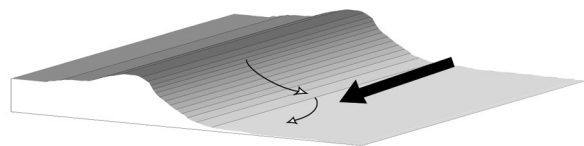
II. L'ÉVOLUTION DES OUTILS D'ANALYSE

Les progrès dans le domaine de l'électronique et de la miniaturisation des capteurs ont permis d'envisager de nouveaux types de mesures et, en parallèle, l'augmentation exponentielle de la capacité de stockage des données permet de limiter la fréquence des interventions humaines sur site. De même, l'évolution des modèles numériques permet d'envisager plus facilement et plus rapidement de nombreuses simulations à condition que les entrées du modèle soient correctement documentées (nature, taux d'humidité et morphologie de la surface, éventuellement structure thermique verticale de la basse troposphère...) et qu'un travail de validation sur site soit réalisé afin de calibrer au mieux le modèle et d'éviter de trop grandes dérives.

A. Les progrès dans la mesure des paramètres météorologiques

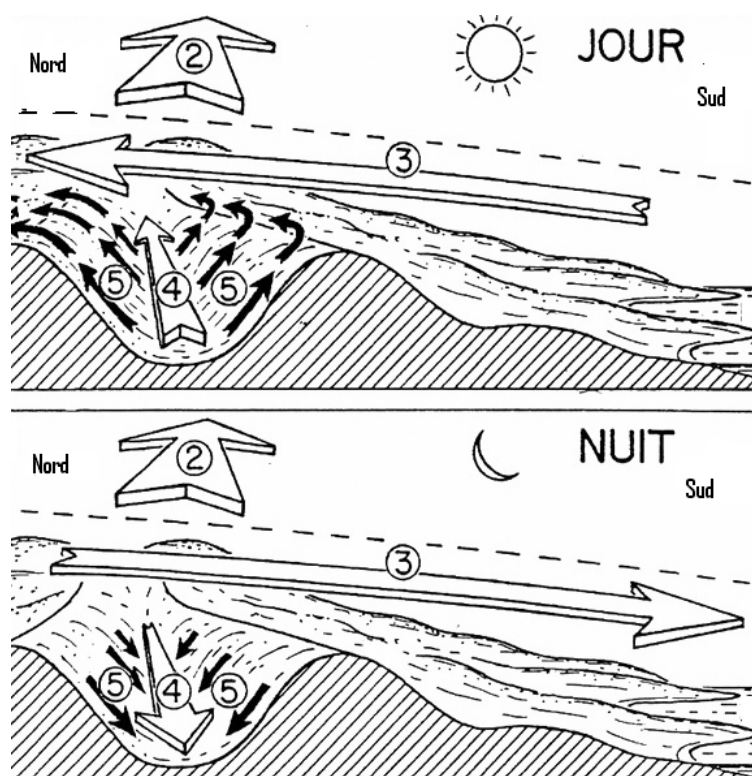
Pour quantifier les mouvements de l'air ou sa température, il existe divers types de capteurs (anémomètres, girouettes, thermo-hygromètres...) permettant de caractériser l'air par des mesures à différentes hauteurs au-dessus de la surface. Ces mesures peuvent aussi se faire dans la couche limite à l'aide de ballons sondes captifs, sous lesquels des capteurs sont placés, afin de mesurer ces mêmes variables météorologiques. Des mesures de la température peuvent aussi être réalisées dans le sol et à sa surface (capteur de température à partir de la mesure de l'infrarouge thermique...) et ces données sont parfois nécessaires pour la modélisation numérique des écoulements de l'air en surface (cf. B).

Dans le cadre d'expertises sur l'estimation des conséquences d'un remblai en bas de coteau viticole en tenant compte



Sur le schéma de gauche, l'air froid véhiculé par la brise est bloqué dans le bas du coteau par le vent synoptique ; sur le schéma de droite, le vent synoptique évacue l'air froid vers l'aval de la vallée.

Figure 4. Relation entre une brise de versant et un vent synoptique dans le bas d'un coteau (Madelin, 2004)



Les flèches n  2 indiquent un vent synoptique qui ne change pas de sens entre le jour et la nuit, la flèche 3 montre la brise de mer (jour) ou de terre (nuit), les flèches 4 et 5, le système des brises orographiques

Figure 5. Exemples de vent synoptique et de brises (littorales et orographiques) interférant les uns avec les autres (Carrega, 1989)

de la direction des écoulements de l'air près de la surface (cf. IV. B. 2), Bridier (2001) et Quénol (2002) ont mesuré les températures à la hauteur des bourgeons de la vigne (environ 50 cm au-dessus de la surface), en utilisant des thermomètres enregistreurs (type *TinyTalk*). Ces capteurs préprogrammés sont utilisés sans abri (l'objectif étant ici d'avoir une température considérée comme la plus proche possible de celle subie par la surface des bourgeons) et ils sont placés sur le site en fin d'après midi, les données étant récupérées ultérieurement pour traitement.... En complément, des mesures de la direction des écoulements avec une girouette en balsa permettent de suivre la direction des écoulements de faible ampleur et au final d'établir les liens entre la répartition des températures minimales et la brise de versant, en tenant compte des vents d'échelle spatiale supérieure (Bridier *et al.*, 2004).

Pour une meilleure explication des processus physiques, l'arsenal de capteurs de mesures peut être beaucoup plus complet, notamment pour quantifier les termes du bilan radiatif. Ainsi, Najjar *et al.* (2005) - dans le cadre du projet RECLUS (Rayonnement, Energie dans la Couche Limite Urbaine de Strasbourg) visant à documenter les différents processus physiques qui interviennent dans l'élaboration du microclimat à l'intérieur d'un canyon urbain - ont réalisé des mesures de flux (radiatif, chaleur sensible et latente, quantité de mouvement) avec un ensemble de capteurs installés à différentes hauteurs dans le canyon. Ces mesures peuvent aussi être utilisées pour documenter un modèle numérique.

B. L'apport récent de la modélisation numérique aux échelles fines

Pour simuler ces interactions entre le substrat (eau, sol, végétation) et la couche limite, les chercheurs font appel à des modèles que l'on peut classer en 3 familles : les modèles statistiques ou semi-empiriques, les modèles réduits à base de maquette et les modèles numériques. Seuls ces derniers - qui existent à différentes échelles et qui ont beaucoup évolué, depuis une dizaine d'années - sont brièvement évoqués ici, car ils permettent de simuler les brises thermiques.

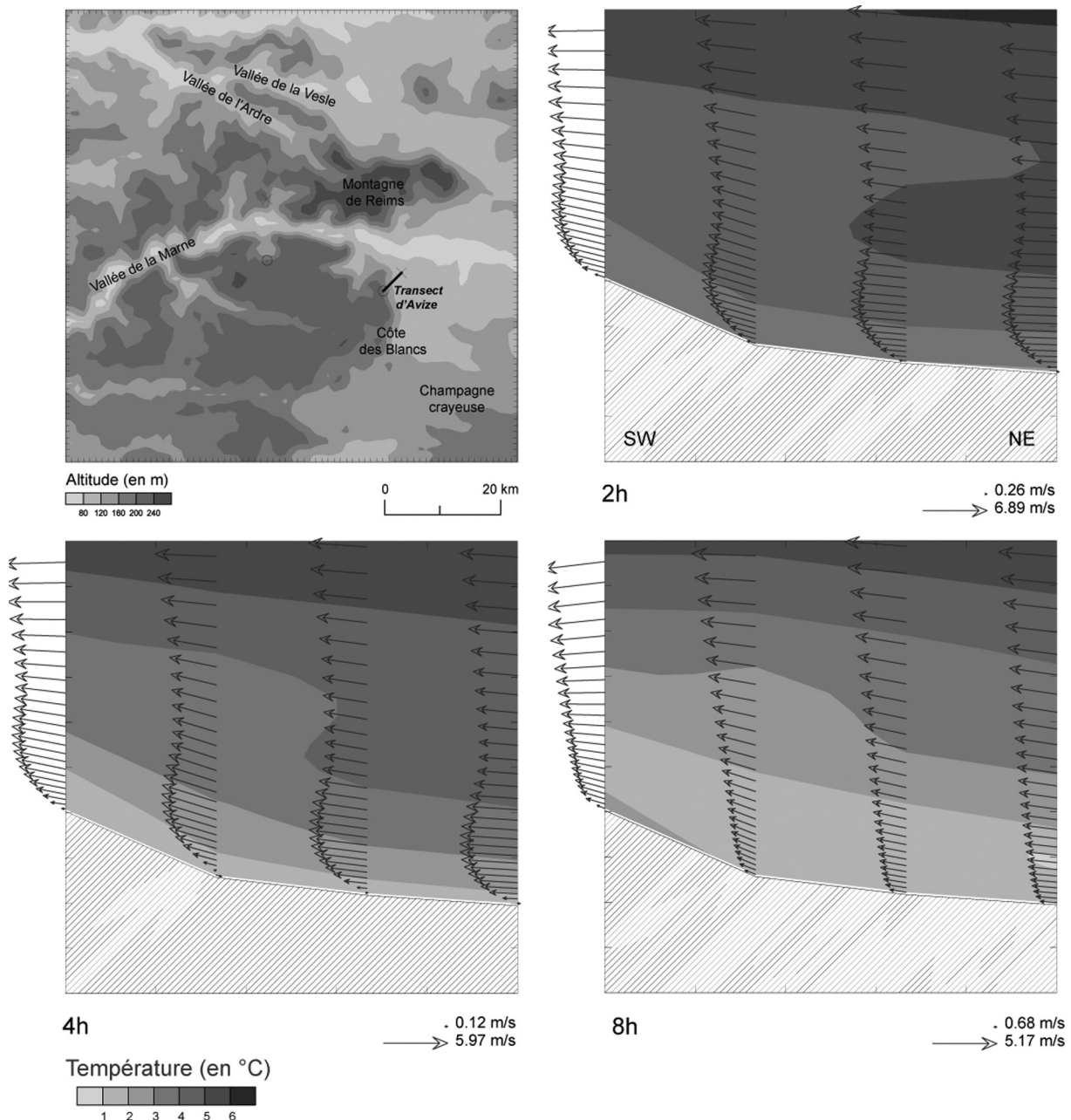
Aux échelles qui nous intéressent ici, il existe des modèles atmosphériques de type *hydrostatique* (volume et masse des particules d'air fixés au cours du temps) ou *non hydrostatique* (ce qui permet de mieux appréhender l'influence du relief), qui donnent des simulations de l'atmosphère sur une large gamme d'échelles. Aux échelles spatiales fines, qualifiées ici de « locales » ou « topoclimatiques » (ordre de grandeur de la centaine de mètres à quelques km), lorsque la précision des données d'entrée du modèle le permet (nature et contenu du substrat, bonne prise en compte de la topographie, structure verticale de l'atmosphère à un instant initial...), ces modèles peuvent simuler convenablement les brises, au moins en ce qui concerne leur direction et l'ordre de grandeur de leur vitesse.

Ainsi, le modèle atmosphérique à méso-échelle non hydrostatique Méso NH, développé conjointement par

Météo France et le laboratoire d'Aérodologie du CNRS à Toulouse (Lafore *et al.*, 1998) et qui a une résolution spatiale nettement plus fine que les modèles météorologiques opérationnels (Arpège/Aladin...), permet de simuler des températures ou des vents dans les trois dimensions ce qui peut être intéressant pour la compréhension du fonctionnement des brises (vitesse et direction, répartition des températures...). La paramétrisation physique des phénomènes influençant l'atmosphère est intégrée par l'intermédiaire de sous-modèles décrivant plus spécifiquement les phénomènes comme la turbulence, la convection ou encore les échanges de

surface. Un *schéma de surface* permet d'intégrer d'une part, les principales caractéristiques de celle-ci, car ces caractéristiques interviennent dans le comportement de la basse troposphère (teneur du sol en eau, en argile, en sable, type de végétation, avec des mailles de l'ordre du km ou de la dizaine de km suivant les variables) ; d'autre part, les conditions atmosphériques initiales (structure de la troposphère à partir de mesures par ballon sonde ou de sorties de modèles opérationnels utilisés pour la prévision météorologique).

La figure 6 montre un exemple de sortie de ce modèle pour la simulation du vent et de la température de l'air,



L'emplacement de la coupe (transect) est indiqué sur la carte. La vitesse du vent, variable d'une coupe à l'autre, et la valeur maximale sont indiquées sur chaque coupe. L'axe horizontal correspond à une distance de 4 200 m, l'axe vertical à 500 m.

Figure 6. Simulation du vent et des températures sur la coupe d'Avize (vignoble de Champagne) à 2 h, 4 h et 8 h (heure locale) durant la nuit du 16 au 17 mars 2003 (Données Méso NH Météo-France, Madelin, 2004)

à 2, 4 et 8 h lors d'une nuit favorable au développement d'une brise de versant (Madelin, 2004). Il s'agit d'une coupe verticale au niveau de la Côte des Blancs, à proximité d'Avize (cuesta orientale du bassin parisien en Champagne). Le modèle simule très bien la mise en place des brises de pente associées à une inversion thermique. Alors qu'en altitude, les températures et les vents sont relativement stables au cours de la nuit, la stratification thermique s'intensifie au cours de la nuit, de quelques degrés sur les premières centaines de mètres (phénomène classiquement repérable ; André et Mahrt, 1982) et le profil logarithmique des vents s'accroît par une diminution de plus en plus marquée dans les basses couches et une légère augmentation au-dessus. À 8h, le réchauffement de la surface commence à se manifester sur ce coteau exposé à l'est et la brise de pente n'apparaît plus sur les résultats de la simulation.

Ce type de modèle apporte des informations intéressantes sur les températures de l'air ou encore sur la dynamique en trois dimensions des mouvements de l'air à un instant donné. Les sorties du modèle montrent aussi les relations qui existent entre la température de l'air au-dessus de la surface et les écoulements de cet air en fonction de la topographie. La comparaison des résultats avec les mesures réalisées pour la date simulée est variable d'un paramètre à l'autre, mais ces résultats sont globalement proches de la réalité observée au moins sur le plan qualitatif (direction des brises). Sur le plan quantitatif, des différences peuvent apparaître (de l'ordre de 1 à 2 m/s pour les écoulements et jusqu'à 3-4°C pour les températures), mais la répartition spatiale des valeurs est cohérente avec les mesures *in situ*.

Cette évolution technique, qui va de pair avec celle de l'informatique et des outils géomatiques, permet d'envisager de nouvelles pistes de recherche en climatologie locale et appliquée.

III. DES APPLICATIONS VARIÉES POUR UNE DEMANDE SOCIALE DIVERSIFIÉE

Sans être exhaustif, compte tenu de l'étendue du sujet, nous évoquons ici quelques grands types d'applications de l'étude des brises, qui mettent en évidence des processus intervenant à des échelles spatiales différentes. Nous les avons regroupés en deux catégories : la santé et l'agroclimatologie.

A. Brise, confort humain et qualité de l'air

La présence de la brise, en entraînant une baisse de la température, a des effets bénéfiques pour l'Homme, par exemple en rafraîchissant l'air dans les régions chaudes ; mais elle peut aussi avoir des effets néfastes, par exemple en concentrant ou en dispersant la pollution émise par les activités économiques et/ou le transport routier.

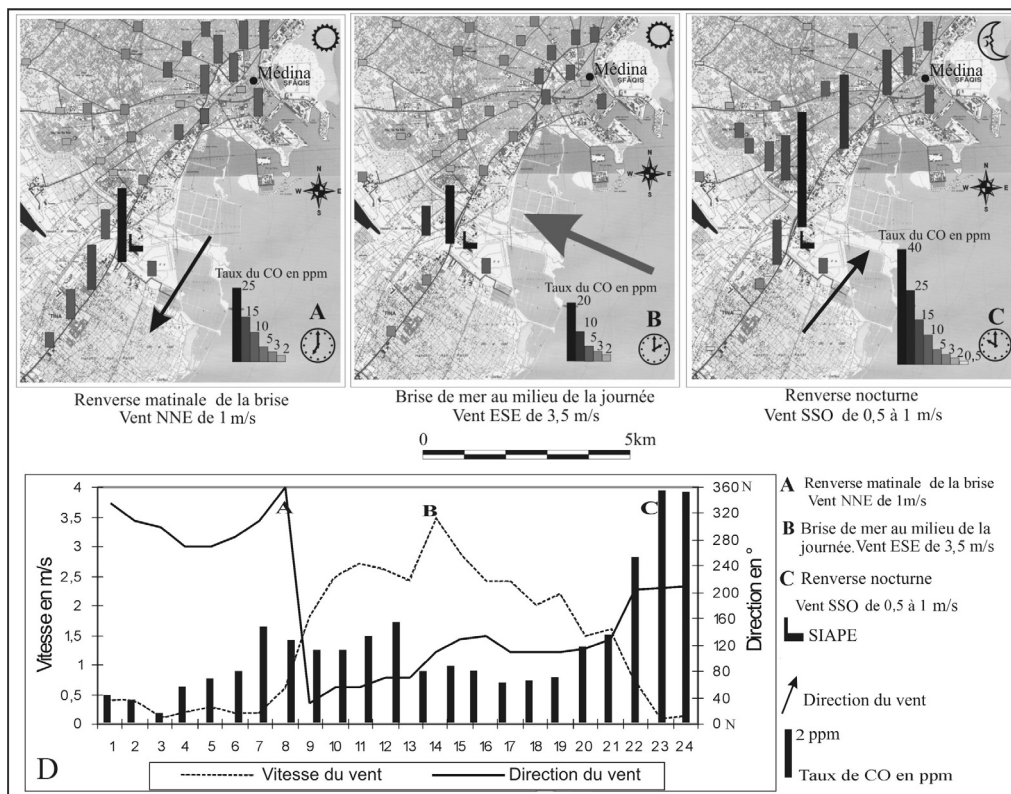
1. L'effet souvent bénéfique pour l'Homme du rafraîchissement de l'air

L'arrivée de la brise de mer sur le continent provoque une baisse de la température de l'air (ou retarde le pic maximal quotidien) ce qui, sous les climats chauds, a un effet bénéfique pour les individus. Par exemple, Besancenot (1988) indique que lorsque la brise de mer atteint La Mecque en Arabie Saoudite (à 60 km de la côte de la mer Rouge), l'arrivée de l'air maritime fait chuter la température de l'air de 4°C en 10 à 15 mn. À Sfax, le 19 juillet 2005, l'arrivée de la brise de mer vers 13h, après une situation de sirocco, a entraîné une baisse de 10°C en une heure (47°C à 12h contre 37 à 13h, à 5 km du littoral, non montré). D'autres études sont aussi réalisées surtout dans les régions à été chaud (Inde, Arabie, Afrique du Nord...), où la brise est attendue par la population qui adapte ses activités et son rythme de vie quotidiens en fonction de l'ambiance climatique de la journée. Cependant, lorsque la chaleur est très importante, l'effet adoucissant de la brise est amoindri et le confort pour l'Homme très réduit voire inexistant.

2. Le transport de la pollution atmosphérique par la brise

Les relations entre la brise et les concentrations atmosphériques en polluants photochimiques ne sont pas simples à établir car, au-delà des transformations relativement rapides enregistrées par les polluants primaires, il y a une grande complexité des interrelations existant entre les différents éléments à prendre en compte (rôle de la circulation atmosphérique d'échelle synoptique qui peut importer des polluants sur des centaines de km, nature des polluants, topographie, occupation du sol qui peut évoluer significativement au fil des saisons...). Les exemples suivants, pris à trois échelles différentes, montrent le lien entre la brise et le taux de polluant dans l'atmosphère.

Aux échelles d'ordre kilométrique, les phénomènes sont les plus perceptibles. À Sfax, ville d'environ 500 000 habitants sur le littoral tunisien, plusieurs établissements industriels très polluants sont intégrés dans le tissu urbain (notamment une usine de traitement des phosphates et un vaste espace dévolu à l'incinération des ordures ménagères de l'agglomération), et la station de mesure de la pollution enregistre assez souvent des valeurs importantes. Certes, les embouteillages du centre de cette agglomération, à plan semi radio-concentrique, sont à l'origine de pointes de pollution relativement élevées durant la journée (trafic pendulaire et embouteillages classiques entre le domicile dans les couronnes et le marché ou les activités tertiaires du centre-ville), mais certains épisodes pollués ne s'expliquent pas par ce trafic. En effet, d'autres pics, tout aussi importants, sont observés en situation de renverse de brise, la nuit, période où il y a très peu de circulation automobile dans l'agglomération (Figure 7). Ces événements, *a priori*, atypiques, apparaissent lors des temps anticycloniques calmes (vents inférieurs à environ 3 m/s) et l'observation des panaches de fumées



Mesures itinérantes du CO réalisées instantanément sur 3 parcours. Le taux de CO enregistré à chaque point de mesures correspond à la moyenne des valeurs sur 2 minutes (capteur Fluke CO-210)

Figure 7. Variabilité spatio-temporelle de la répartition du monoxyde de carbone (CO) au centre et au sud de l'agglomération de Sfax le 12/08/2004 à 7h (A), 14h (B) et 22h (C) ; variabilité quotidienne de la vitesse, de la direction du vent et du CO dans le centre ville pour cette même journée (D) (Dahech *et al.*, 2006). (Données : Agence Nationale de la Protection de l'Environnement de Tunisie et campagne de mesures PRODIG)

confirmée par une modélisation numérique (Khlaifi *et al.*, 2008) montrent que les polluants sont déplacés par la brise, depuis l'usine de traitement des phosphates et la décharge de l'agglomération qui les émettent en continu.

En situation atmosphérique stable - ce qui est relativement fréquent dans cette ville méditerranéenne (sur la période 1970-2004, d'avril à octobre, la brise littorale est détectée, en moyenne, dans 70 % des jours) - les fumées se déplacent en fonction de la direction des brises et, durant le cœur de la longue saison chaude (juillet-août), le panache de fumées se positionne au-dessus du centre-ville vers 23-24 h. Sauf à déplacer ces établissements industriels, ce qui occasionnerait manifestation des coûts économiques majeurs, il n'y a pas grand-chose à faire face à cet état de fait, si ce n'est établir, en liaison avec les services météorologiques, un modèle de prévision permettant de prévoir l'apparition d'une situation de brise. Cette prévision permettrait d'informer les personnes les plus vulnérables afin de limiter leur exposition (ou imposer l'arrêt momentané de la production pendant les heures critiques...). En revanche, pour tout projet industriel futur, ce type d'étude devrait être systématiquement préconisé, cela permettrait de limiter les problèmes de santé publique qui ont un fort coût social et économique.

À une échelle de l'ordre de quelques dizaines de km, l'exemple des épisodes de pollution à l'ozone (O_3) illustre

aussi cette relation entre brise et pollution atmosphérique. Ces épisodes apparaissent principalement en situation estivale, lorsque les conditions météorologiques sont favorables aux réactions photochimiques aboutissant à la formation de ce gaz. Dans les régions soumises à la brise littorale, au cours de la nuit et en début de matinée, les polluants peuvent être déplacés vers la mer par la brise de terre (Janoueix-Yacom, 1995 ; Dudouit, 2004). Puis, dans la journée, la brise circule vers la terre en ramenant une partie des polluants qui peuvent alors s'ajouter à ceux émis au même moment par les activités humaines. Lorsque les conditions météorologiques sont favorables, la pollution peut s'accumuler sur quelques jours (on parle de *re-circulation*) et cette pollution d'origine locale/régionale peut aussi s'ajouter à une pollution importée sur de plus grandes distances encore (masse d'air qui arrive sur une région donnée après s'être déplacée sur plusieurs centaines de km).

À une échelle spatiale encore plus vaste, le même phénomène peut être observé, notamment dans le fond de vastes vallées ou sur le piémont de massifs montagneux importants. Dans ce type d'espace, lorsque des sources de pollution sont présentes, les brises thermiques jouent un rôle essentiel dans l'explication du transport de ces polluants. Ainsi, Ruffieux *et al.* (1991), ont montré, pour l'agglomération de Denver (USA) située entre les grandes plaines du centre du pays (est) et les *Rocky Mountains* (ouest), que lorsque le temps

est clair et calme, les basses couches se refroidissent et l'air coule en traversant l'agglomération de Denver avec une vitesse de 2   10 m/s. Deux couches d'air sont distinguées : celle contenant les polluants émis à proximité de la surface qui dérive lentement et va s'accumuler dans les cuvettes (il y a inversion de température) et celle d'altitude, vers 100 à 200 m, qui se déplace plus vite et entraîne la pollution  mise par les cheminées des établissements industriels vers l'aval. Ce schéma évolue avec un cycle quotidien : la couche froide superficielle qui s'est déplacée vers l'aval durant la nuit peut revenir au-dessus du centre de l'agglomération avec le réchauffement du matin. L'analyse des relations entre les différents types de situations météorologiques sur la région et les épisodes de pollution dans l'agglomération a permis de définir un modèle de prévision de ces épisodes basé sur les variables météorologiques. Mais cette étude, comme de nombreuses autres, a aussi mis en évidence la très grande complexité des mécanismes qui interviennent pour expliquer la relation entre météorologie et pollution de l'air. Cela est d'autant plus évident, que la ville est un milieu complexe qui génère aussi ses propres brises canalisées   différentes échelles par la topographie...

Il ressort de ces études que, paradoxalement, des régions rurales, parfois éloignées des sources d'émissions, enregistrent des taux de certains polluants qui peuvent être, à un instant donné, supérieurs à ceux relevés plus près des zones sources, notamment lorsque une brise interfère avec un vent d'échelle spatiale supérieure qui importe la pollution. Comme il n'est pas toujours facile de prévoir la part respective de tous les phénomènes qui interviennent à diverses échelles de temps et d'espace il est alors bien difficile d'envisager une prévision opérationnelle.

Dans un tout autre domaine, la prévision à court terme du gel dommageable en agriculture pose aussi des problèmes de fiabilité générés en partie par une mauvaise connaissance des écoulements de versants, pourtant la fiabilité des prévisions à l'échelle locale est primordiale pour inciter les agriculteurs à mettre en place une lutte antigel.

B. Brise de pente et air froid dommageable dans les espaces agricoles sensibles

La formation de véritables lacs d'air froid formés par des écoulements froids nocturnes est encore un domaine bien connu des agriculteurs concernés qui, par expérience acquise au fil du temps, connaissent les parcelles les plus vulnérables pour la vigne ou certains arbres fruitiers. Ces espèces résistent bien aux basses températures en hiver (dormance de la plante), mais sont plus vulnérables à des températures froides au printemps, à partir du débourrement (ouverture des bourgeons). Par exemple, la vigne supporte des températures autour de -15 à -20 C en hiver, mais dans les jours qui suivent son débourrement au printemps, elle peut subir un gel destructeur pour les jeunes bourgeons à partir de -2 C.

1. Les lacs d'air froid dans les vignobles

Durant la nuit, en situation favorable à un fort refroidis-

sement superficiel (ciel clair, vent régional ou synoptique nul ou très faible), la surface du sol et de l'air au-dessus se refroidissent. En présence de reliefs, cet air froid pelliculaire forme une brise de versant qui s'écoule sur les pentes vers les points les plus bas où un lac d'air froid se met en place dans les cuvettes, les fonds de vallée ou en « amont » des replats (naturels, infrastructure de transport en remblai) empêchant l'évacuation de cet air hors des cultures vulnérables au froid. Au printemps, ce lac froid se dissipe progressivement avec l'apparition des rayons du soleil au petit matin, mais avant cela, il peut en quelques minutes détruire les jeunes bourgeons et ainsi compromettre la récolte.

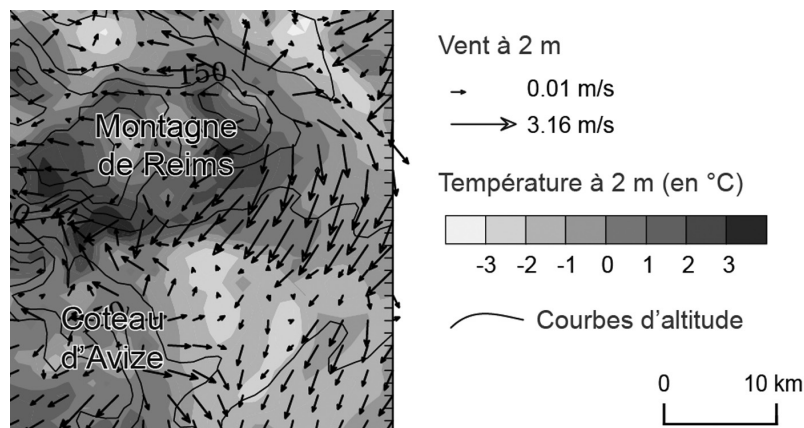
Dans les espaces agricoles sensibles (vignoble, arboriculture), les agriculteurs, par expérience, utilisent diverses stratégies, soit pour réduire la probabilité de ce gel dommageable (absence de plantations dans les cuvettes ou en amont des replats sur les coteaux, date de taille tardive pour retarder la reprise végétative, choix de cépages   débourrement plus tardif que ceux des parcelles mieux protégées...) ; soit pour lutter contre ce fléau économique avec divers systèmes de lutte antigel (chaufferette, brassage de l'air froid, aspersions d'eau...). Mais comme cette lutte antigel nécessite une intervention humaine de nuit (et donc un coût pour l'exploitant), les viticulteurs souhaitent disposer de prévisions fiables aux échelles spatiales fines (parcelle). C'est pour cela que les viticulteurs champenois, par l'intermédiaire du Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne, ont confié à une équipe de géographes climatologues une étude visant à préciser les liens entre les températures minimales et les écoulements d'air sur un coteau (Beltrando *et al.*, 1992 ; Beltrando, 1998 ; Madelin, 2004). Parmi les résultats, Madelin (2004), notamment à partir de simulation Méso NH (cf. III. B), montre la relation entre les températures et les brises de versant mais aussi les interactions entre ces brises et le flux général, comme l'illustrent ici les sorties de la simulation pour l'est de la Montagne de Reims (Figure 8) où on observe des différences thermiques, pour des mêmes altitudes :

- au nord, les brises de pente rencontrent le flux général, de composante est, ce qui bloque l'écoulement de l'air froid en bas de coteau ;
- par contre, à l'est, le vent simulé, de direction nord-nord-est et assez fort, semble évacuer l'air froid qui pourrait s'accumuler à cet endroit ;
- au sud, un secteur très froid semble lié aux écoulements d'air froid du coteau d'Avize bloqués par ce flux de nord.

D'une manière générale, les coteaux exposés au vent sont beaucoup plus froids que ceux sous le vent.

2. L'aménagement d'infrastructure de transport : le cas des Lignes   Grande Vitesse

Les infrastructures de transport, pour respecter les normes liées à la vitesse, à la sécurité et à l'économie d'énergie, doivent s'affranchir partiellement des contraintes



Le site modélisé a une topographie qui varie de 80 à 250 m sur la partie cartographiée ; la date choisie correspond à une période de temps très calme.

Figure 8. Simulation Mésoscale des champs de vent et de température à 2 m, le 17 mars 2003 à 6h. UTC (Mésoscale - Météo France, résolution 1 km, Madelin, 2002)

topographiques du milieu traversé. Ainsi, en France, pour la construction des Lignes à Grande Vitesse (LGV) utilisées par les Trains à Grande Vitesse (TGV), les infrastructures nouvelles traversent, en remblai dans certains secteurs ou en déblai dans d'autres, des secteurs agricoles sensibles au phénomène de gelées printanières. C'est le cas de la LGV Est européenne (Paris – Strasbourg) qui, dans l'Avant Projet Initial, devait traverser le bas des coteaux viticoles du Nord de la Montagne de Reims, en Champagne (100 km à l'est de Paris). La présence d'un remblai de seulement 3 à 5 mètres de haut, mais sur quelques centaines de mètres de long, aurait alors constitué un véritable piège à l'écoulement de l'air froid pour les situations atmosphériques stables (Figure 9). Dans les vignobles concernés, avant construction de la LGV, un lac d'air froid pouvait se former dans les parties en creux mais l'air froid n'atteignait que rarement la vigne qui restait la plupart du temps hors de danger vis-à-vis de cet aléa (Bridier *et al.*, 1995 ; Beltrando *et al.*, 2002). La présence d'un remblai en modifiant l'aérodynamique superficielle locale aurait donc créé un problème pour les viticulteurs concernés.

Sur deux sites de la LGV est européenne, dans la partie traversant le vignoble de Champagne, les résultats des études climatiques, demandées par le Maître d'ouvrage avant la construction de l'ouvrage, ont confirmé le blocage, par le remblai, de l'air s'écoulant par gravité et l'augmentation du risque de gel dommageable pour la vigne. Ces résultats ont abouti à un certain nombre d'aménagements - dans et autour du remblai de la LGV ou des murs antibruit qui la bordent dans les zones habitées - pour laisser passer une partie de l'air froid (abaissement de la hauteur de la voie, création d'ouvertures dans l'infrastructure ou dans les murs antibruit), ce qui augmente le mouvement et donc le brassage de l'air près de la surface (Quénol *et al.*, 2007). Sur le site évoqué ci-dessus, la forme des murs antibruit a été modifiée de manière à laisser passer partiellement l'air froid, sans modifier sensiblement l'acoustique (non montré). Sur un autre site voisin, pour réduire le volume du lac d'air froid créé par ce remblai toujours en contrebas d'un coteau planté en vigne, le

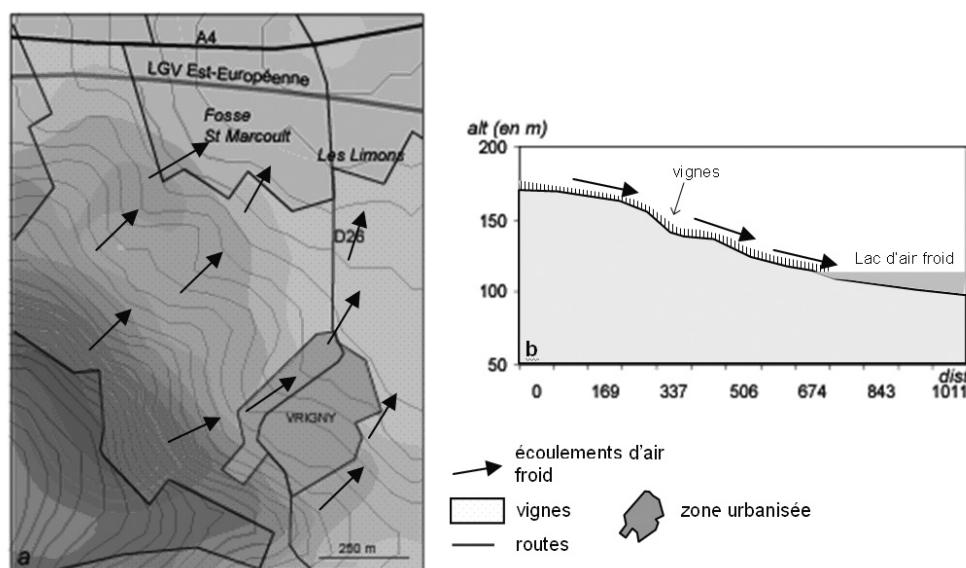
comblement partiel de la cuvette créée par la voie ferrée a dû être réalisé et la hauteur du remblai rabaisée afin de réduire le volume d'air froid. Tout ces aménagements, qui peuvent être relativement coûteux, ont manifestement permis de réduire le risque de gel dommageable d'autant plus que dans ce secteur la vigne ne peut être replantée ailleurs, compte tenu des contraintes liées à son classement en Appellation d'Origine Contrôlée.

De telles études ont aussi été réalisées dans d'autres espaces agricoles sensibles au gel printanier (Vallée de la Durance, coteaux alsaciens) et, dans toutes ces études, les résultats ont été pris en compte par le Maître d'œuvre avec qui les climatologues ont étudié des possibilités d'aménagement permettant de réduire au mieux le risque de gel.

CONCLUSION

Le fonctionnement des brises thermiques est d'autant plus complexe à décrire que le milieu concerné l'est et une réflexion préalable sur le choix des niveaux d'échelles à prendre en compte est toujours nécessaire aussi bien dans le cas d'études s'appuyant sur des campagnes de mesures (représentativité des points d'observation...) que sur celles reposant principalement sur un modèle numérique (précision dans les entrées du modèle, dont certaines sont variables dans le temps).

Si les effets bénéfiques des brises sont connus depuis des millénaires par l'Homme, qui a appris progressivement à les utiliser au mieux, d'autres effets sont parfois mal pris en compte parce que l'Homme n'y pense pas ou espère pouvoir s'en affranchir avec la technologie moderne (mauvaise ventilation dans les rues et les appartements, pollution de l'air...). Il n'est certes pas possible de contrer tous les effets néfastes - directs ou indirects - d'une brise (par exemple la concentration de la pollution atmosphérique ou le déplacement de l'air froid sur des cultures sensibles aux basses températures), mais dans certains cas, une meilleure connaissance du phénomène peut permettre, aux météorologistes et/ou aux climatologues, de mieux



La coupe (SO-NE) montre l'accumulation d'air froid en « amont » du remblai, cet air froid atteint le bas du coteau viticole (Fosse St Marcoult) car il ne peut plus s'évacuer en raison de la présence du remblai de la LGV. Altitude du point haut 200 m, altitude du point bas (95m).

Figure 9.  coulement de l'air froid nocturne le long d'un coteau viticole, en « amont » d'un remblai d'une infrastructure de transport (Site de Vrigny sur la LGV Est-Européenne)

prévoir son apparition. Cette prévision peut s'obtenir à partir de variables météorologiques classiques (température à la surface de l'eau et de la terre, situation météorologique d'échelle synoptique...), avec une échéance de quelques heures, elle permet d'informer les personnes concernées (personnes vulnérables à un air de qualité médiocre, agriculteurs équipés de moyens de lutte antig l...).

  l'échelle de l' v nement météorologique, dans le domaine de la pollution de l'air, de tels résultats peuvent aussi aider à la prise de décisions permettant de réduire les polluants, lorsque la situation météorologique favorise la formation de brises (limitation des activités industrielles les plus polluantes, réduction de la vitesse sur route...). Dans de nombreuses régions de plusieurs pays des systèmes de prévision de tels épisodes existent et, d'une manière générale, ils prouvent leur efficacité dans l'intérêt collectif.

  l'échelle climatologique, ils pourraient aussi aider à mieux positionner de nouveaux établissements industriels ou de nouveaux axes de circulation qui sont tous deux sources de pollutions et de nuisances. Mais à ce niveau-là, les décisions dépendent, bien souvent, de nombreux autres facteurs, notamment économiques et politiques, qui souvent pèsent bien plus que les préconisations des scientifiques.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRÉ J.-C. & MAHRT L. 1982. The Nocturnal Surface Inversion and Influence of Clear-Air Radiational Cooling. *J. Atmos. Sci.*, 39, pp. 864-878.
- BELTRANDO G. 1998. Les gelées printanières en Champagne viticole : quelques résultats obtenus à partir d'un nouveau réseau de stations automatiques. *La Météorologie*, VIII  série, 21, pp. 30-43.
- BELTRANDO G., BRIDIER S., MADELIN M. & QUÉNOL H. 2002.

 valuation de l'impact d'un futur remblai de la ligne à Grande Vitesse est européenne sur le risque de gel dans le vignoble de Champagne. *Hommes Terres du Nord*, 1, pp. 40-52.

- BELTRANDO G., LECOMPTE M. & SARMIR I. 1992. Le gel dans le vignoble champenois : itinéraires topoclimatiques pour la mesure de l'Infra Rouge Thermique. *Publ. de l'AIC*, 5, pp. 335-342.
- BESANCENOT J.-P. 1988. Climat et santé en milieu chaud : l'exemple du p lerinage de La Mecque. *Cahiers du Centre de Recherche Climatologie*, Université de Bourgogne, 12, pp. 9-17.
- BRIDIER S. 2001. *Modélisation de la répartition des brises et des températures en situation radiative*. Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université Denis Diderot, 189 p.
- BRIDIER S., QUÉNOL H. & BELTRANDO G. 1995.  valuation de l'influence d'un ouvrage linéaire en remblai - le TGV Est - sur l'écoulement de l'air froid dans le vignoble champenois. *Publ. de l'AIC*, 8, pp. 233-240.
- BRIDIER S., QUÉNOL H. & BELTRANDO G. 2004. Cartographie du potentiel de refroidissement en situation radiative. *Revue Internationale de Géomatique*, 14, 1, pp. 119-132.
- CANTAT O. 2004. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191, 2, pp. 75-105.
- CARREGA P. 1989. Vents et échelles de contraintes géographiques : exemples en région niçoise. *Publ. de l'AIC*, 2, pp. 83-88.
- CARREGA P. 1994. Topoclimatologie et habitat. *Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*, 35 et 36, 408 p.
- CHARABI Y. 2001. *L'îlot de chaleur urbain de la métropole*

- lilloise : mesures et spatialisation*. Thèse de doctorat de l'Université de Lille 1, 247 p.
- DAHECH S. 2007. *Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de doctorat de l'Université Paris VII, 309 p.
- DAHECH S., BELTRANDO G. & QUÉNOL H. 2006. Brise de mer et pollution atmosphérique à Sfax (Tunisie). *Pollution atmosphérique*, 190, pp. 211-223.
- DAMATO F., PLANCHON O. & DUBREUIL V. 2003. A remote sensing study of the inland penetration of sea breeze fronts from the English channel. *Weather*, 58, pp. 219-225.
- DETTWILLER J. 1970. *Évolution séculaire du climat de Paris. Influence de l'urbanisation*. Mémoire Météorologie Nationale, 52, 83 p.
- DUDOUIT A. 2004. Une étude de brise de mer dans la région caennaise : vers une aide à la prévention de la pollution photochimique en milieu littoral. *Noréis*, 4, 193, pp. 31-45.
- DUDOUIT-FICHET A. 2006. *Brise de mer et brise de terre et risque de pollution photochimique dans la région caennaise (Basse-Normandie)*. Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université de Caen, 442 p.
- ESCOURROU G. 1990. La spécificité du climat de l'agglomération parisienne. *Rev. Géogr. de Lyon*, 65, 2, pp. 85-89.
- FALLOT J.-M. 1992. *Étude de la ventilation d'une grande vallée préalpine (la vallée de la Sarine en Gruyère)*. Thèse de l'Université de Fribourg (Suisse), 475 p.
- FINDLATER J. 1964. The sea breeze and inland convection. *Met Mag*, 93, pp. 82-89.
- FRIZZOLA J.A. & FISHER E.L. 1963. A series of sea breeze observations in the New York City area. *J. of Appl. Meteor.*, 2, pp. 722-739.
- GEIGER R. 1966. *The climate near the ground*. Cambridge : Harvard University Press, 611 p.
- JANOUEIX-YACONO D. 1995. Rapport entre la brise de mer ou de lac, structure de la couche limite planétaire et pollution atmosphérique sur les plaines littorales urbanisées, in *Climat, pollution atmosphérique, santé. Hommage à G. Escourrou*. Groupement de Recherche Climat et Santé, Dijon, pp. 177-201.
- KASTENDEUCH P. 1996. *Analyse à plusieurs échelles et modélisation des régimes de vent d'été dans le fossé Rhénan méridional*. Thèse de Doctorat de géographie de l'université de Strasbourg 1, 161 p.
- KASTENDEUCH P., NAJJAR G. & RINGENBACH N. 2006. Modélisation du bilan radiatif et d'énergie d'un canyon urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 3, pp. 25-42.
- KHLAIFI A., DAHECH S., BELTRANDO G., IONESCU A. & CANDAU Y. 2008. Spatial dispersion modelling of SO₂ according to the atmospheric circulation in a coastal city : Sfax (Tunisia). *Meteor. Application*, sous presse.
- LAFORE J.-P., STEIN J., ASENCIO N., BOUGEAULT P., DUCROCQ V., DURON J., FISHER C., HEREIL P., MASCART P., MASSON V., PINTY J.-P., REDELSPERGER J.-L., RICHARD E. & VILA-GUERAU DE ARELLANO J. 1998. The Meso-NH Atmospheric simulation system. Part I : adiabatic formulation and control simulations. *Ann. Geophysicae*, 16, pp. 90-109.
- LOWRY W.P. 1997. Empirical estimation of urban effect on climate : a problem analysis. *J. of Appl. Meteor.*, 16, pp. 120-129.
- MADELIN M. 2004. *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne. Modélisation spatiale à une échelle fine des écoulements de l'air et des températures minimales*. Thèse de doctorat de l'Université de Paris VII, 347 p.
- NAJJAR G., KASTENDEUCH P., RINGENBACH N., COLIN J.R., STOLL M.P., NERRY F., BERNARD J., DE HATTEN A., LUHAHE R. & VIVILLE D. 2005. Bilans radiatifs et énergie dans un canyon urbain. *Annales de l'AIC*, 2, pp. 41-54.
- OKE T.R. 1993. Meteorology for the urban environment: Technology-Transfer Options. *WMO Bulletin* 42, pp. 214-217.
- OKE T.R. 1987. *Boundary Layer Climate*. II Edition, Methuen, London and New York, 435 p.
- PÉDELABORDE P. 1985. Les brises de mer et les brises de terre. *Géographie et Recherche*, 54, pp. 97-111.
- PLANCHON O. 1997. *Les climats maritimes du Monde*, Éd Septentrion, 233 p.
- QUÉNOL H. 2002. *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral*, Éd Septentrion, 233 p.
- QUÉNOL H., BELTRANDO G. & BRIDIER S. 2007. Risques de gel accru liés à la présence d'ouvrages linéaires en remblai, *EchoGéo*, 1, Mis en ligne le 22 février 2008: <http://echogeo.revues.org/index1052.html>
- RUFFIEUX D., KING C.-W. & NEFF W. 1991. Quelques aspects de la ventilation et de la pollution de l'air dans l'agglomération de Denver. *Publ. de l'AIC*, 4, pp. 15-20.
- SIMPSON J.E. 1994. *Sea breeze and local wind*. Cambridge University Press, 234 p.
- WHITE I.D., MOTTERSHEAD D.N. & HARRISON S.J. 1992. *Environmental systems*. Chapman & Hall, 616 p.

Adresse des auteurs :

Gérard BELTRANDO
Université Paris-Diderot,
UMR 8586 (PRODIG) du CNRS,
F-75205 Paris Cedex 13
beltrando@univ-paris-diderot.fr

Salem DAHECH
Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Sfax,
Laboratoire SYFACTE - Sfax – Tunisie
salem.dahech@univ-paris-diderot.fr

Malika MADELIN
Université Paris-Diderot,
UMR 8586 (PRODIG) du CNRS
F-75205 Paris Cedex 13
malika.madelin@wanadoo.fr

